

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ПРОТИВОПОМПАЖНАЯ СИСТЕМА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д. Д. КУДАШОВ, В. П. ТОКАРЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Уфа, Россия
E-mail: Neruman@nextmail.ru*

Рассматриваются факторы, влияющие на возникновение неустойчивого режима работы газотурбинных двигателей (ГТД), связанного со скоростью изменения расхода воздуха — помпаж. Рассмотрена проблема быстрого действия диагностирования помпажа в компрессоре ГТД. Предложены варианты повышения быстрого действия систем, диагностирующих помпаж ГТД. Выполненное моделирование работы противопомпажной системы с помощью симулятора мажоритарного диагностирования предпомпажного состояния и помпажа показало, что использование первых производных рабочих параметров уменьшает время диагностирования на 40—120 мс в зависимости от режима функционирования, а также благоприятно сказывается на быстром действии всей системы в целом.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, помпаж компрессора, измерение параметров, система диагностирования, противопомпажная система

Неустойчивый режим работы газотурбинных двигателей (ГТД), связанный со скоростью изменения расхода воздуха, — помпаж — представляет собой серьезную проблему при эксплуатации ГТД. При помпаже возникают периодические колебания давления и расхода воздуха в продольном направлении, характеризующиеся малой частотой и большой амплитудой. Происходит срыв потока воздуха со спинок лопаток компрессора, и возникают неустойчивые завихрения, которые усиливаются со временем. Наступает момент, когда вихревая пелена заполняет межлопаточные каналы, и компрессор перестает обеспечивать воздухом камеру сгорания. В результате перепада давления на выходе компрессора и на входе камеры сгорания воздушная масса выбрасывается на вход компрессора, „смывая“ вихревую пелену. Эта же масса воздуха вновь поглощается компрессором, вновь возникает срыв потока и происходит выброс на вход компрессора [1]. В результате многократного повторения „поджатия“ температура воздуха в компрессоре возрастает за счет постоянного подвода энергии и превышает допустимые для эксплуатации компрессора значения [2]. Когда автоколебания достигают резонансной частоты рабочей лопатки компрессора, существенно возрастают динамические нагрузки как на лопатки, так и на силовую установку в целом, это может вызвать вплоть до разрушения ГТД [3].

В настоящей статье рассмотрено быстрое действие противопомпажных систем ГТД, а также описан метод увеличения быстрого действия на основе скорости изменения рабочих параметров ГТД.

Своевременное срабатывание противопомпажной системы позволяет не допустить пиковых амплитуд колебаний воздуха и перевести ГТД на устойчивые режимы работы, при которых помпаж затухает самостоятельно. Однако использование противопомпажных систем требует некоторого времени.

Так, например, выход рабочих параметров за пороговое значение (относительное изменение на 5 %) может составлять до 190 мс; время обработки микроконтроллером алгоритма диагностирования в зависимости от сложности последнего и технических характеристик авиационного микроконтроллера может занимать до 150 мс; время реагирования клапана перепуска — до 140 мс. Быстрое действие датчиков температуры — от 1 мс (пирометр спектрального отношения) до нескольких секунд (термопара) — зависит от типа и измеряемого рабочего параметра.

За время от момента возникновения помпажа до его устранения эффективное давление воздуха на выходе компрессора упадет до 60 % от рабочего, а температура в камере сгорания поднимется на 18—19 % (рис. 1) до 380—420 °С [2]. Скачки давления и температуры негативно сказываются на всех элементах конструкции компрессора, способствуя уменьшению запаса прочности и возникновению различного рода дефектов.

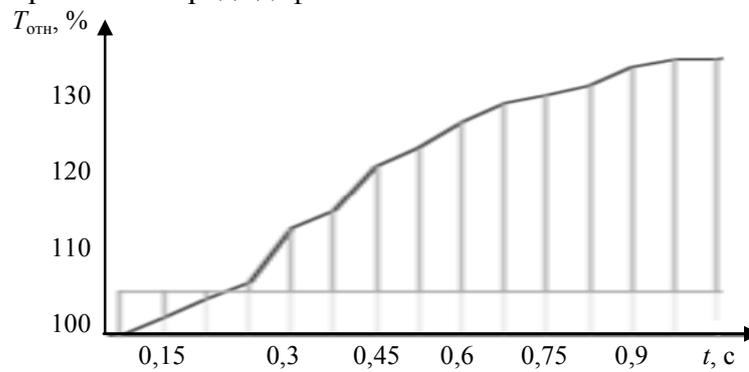


Рис. 1

Авторы предлагают сократить время отклика на возникновение помпажного состояния за счет:

- использования малоинерционных датчиков для измерения наиболее информативных рабочих параметров ГТД (измерение температуры газа на выходе камеры сгорания пирометром спектрального отношения требует до 2 мс, в то время как получение информации о температуре выходящего из сопла газа с помощью термопар занимает секунды);

- использования более быстродействующих противопомпажных механизмов (ленты перепуска, изменяемое сопло), в том числе и управляемых, снижающих амплитуду колебаний воздуха при неполном открытии (регулируемые клапаны перепуска давления, механизмы поворота лопаток);

- повышения точности диагностирования и, как следствие, уточнения пороговых значений рабочих параметров.

Для повышения надежности прогнозирования предпомпажного состояния предлагается сравнить измеренные значения цветовой температуры газа за камерой сгорания T_3 [4] (вместо температуры выходящих газов T_4), угловой скорости вращения ротора турбины ГТД ω , разницу между давлением на выходе компрессора и давлением на входе компрессора ΔP , с пороговыми значениями, связанными с мгновенным расходом топлива G , высотой полета и скоростью ЛА.

Определение первых производных температуры газа $\partial T/\partial t$, разницы давления на входе и выходе компрессора $\partial \Delta P/\partial t$, угловой скорости вращения вала ротора турбины $\partial \omega/\partial t$ и сравнение их с пороговыми значениями: $[\partial T/\partial t]$, $[\partial \Delta P/\partial t]$, $[\partial \omega/\partial t]$, функционально зависящими от мгновенного расхода топлива G , дает более достоверную информацию. Во время начала помпажа первые производные этих параметров выйдут за соответствующие пороговые значения, вычисленные посредством специального программного алгоритма. Для формирования сигнала о начале помпажа достаточно выхода за пороговые значения вычисленных производных двух параметров. Для реализации мажоритарного голосования используются условия выхода первых производных за их пороговые значения ($\partial T/\partial t > [\partial T/\partial t]$, $\partial \Delta P/\partial t < [\partial \Delta P/\partial t]$, $\partial \omega/\partial t < [\partial \omega/\partial t]$). При отклазе одного из датчиков информации от оставшихся достаточно для формирования сигнала начала помпажа, что повышает надежность способа. Предлагается структурная схема, реализующая метод диагностики предпомпажного состояния ГТД (рис. 2, здесь ДД — датчик перепада давления в компрессоре; ДТ — датчик температуры газа; ДЧ — датчик частоты вращения ротора; ДВ — датчик вибраций; ДРТ — датчик расхода топлива; ДАУ — датчик аэродинамических углов ВП — вторичный преобразователь; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;

МК — микроконтроллер; ППСУ — противопопаяная система управления; ИМ — исполнительный механизм; СИ — система индикации; БРП — блок регистрации параметров) [5].

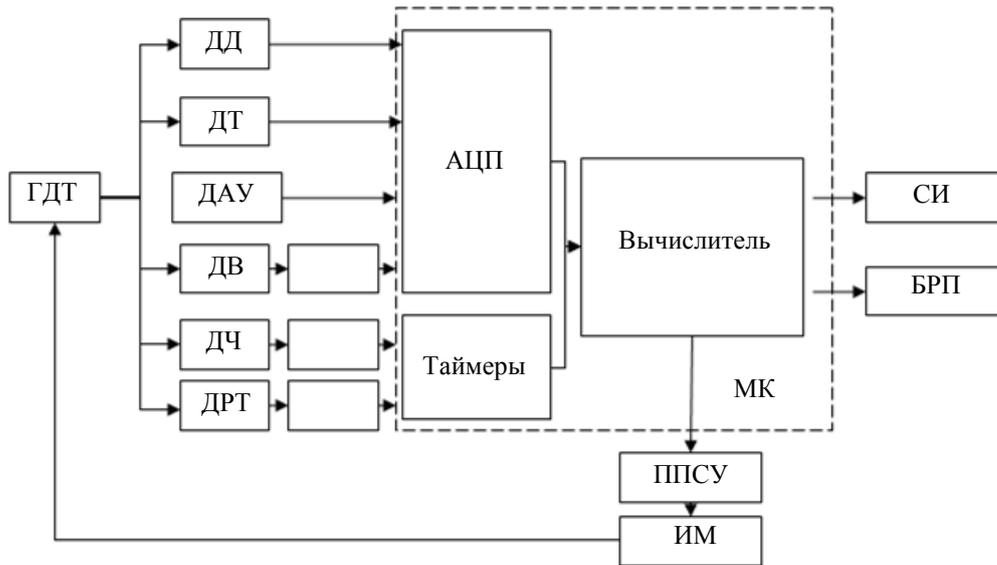


Рис. 2

Ложного срабатывания одного датчика недостаточно для формирования сигнала начала помпажа, что повышает достоверность способа. При увеличении мгновенного расхода топлива в беспомпажном состоянии ГТД характерны рост температуры газа T , увеличение угловой скорости вращения ротора турбины ГТД ω и рост разницы давления на входе и выходе компрессора ΔP . Использование цветовой температуры газа за камерой сгорания позволяет существенно уменьшить временную задержку измерения температуры сгорания, в связи с практической безынерционностью газа, по сравнению с использованием термопар [6].

Моделирование работы противопопаяной системы с помощью симулятора работы мажоритарного диагностирования предпомпажного состояния и помпажа [7] показало, что использование первых производных рабочих параметров уменьшает время диагностирования на 40—120 мс в зависимости от режима работы, а также благоприятно сказывается на быстродействии всей системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичков Б. А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. М.: МГТУГА, 2006. 73 с.
2. Пат. 2382909 РФ. Способ диагностики помпажа компрессора / В. С. Чигрин, И. В. Чурбаков. Заявл. 15.05.2008; опубл. 27.02.2010.
3. Макаева Р. Х., Каримов А. Х., Царева А. М., Фатыхова Э. Р. Экспериментально-теоретическое исследование вибрационных характеристик рабочей лопатки компрессора ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. Т. 55, № 1. С. 20—22.
4. Токарев В. П., Кудашов Д. Д. Система диагностирования и предпомпажного состояния газотурбинного двигателя // Вестн. УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1 (62). С. 73—78.
5. Токарев В. П., Кудашов Д. Д. Повышение надежности диагностирования предпомпажного состояния ГТД // Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2013. 318 с.
6. Пат. 2527850 РФ. Способ диагностики помпажа компрессора газотурбинного двигателя / В. А. Токарев, Д. Д. Кудашов. Заявл. 29.07.2013; опубл. 10.09.2014.
7. Свид. о рег. прогн. № 2014615364. Симулятор работы мажоритарного диагностирования предпомпажного состояния и помпажа „СРМДПС-1“ / Д. Д. Кудашов, В. П. Токарев, Д. Ф. Муфаззалов. 2014.

Сведения об авторах

- Дмитрий Дмитриевич Кудашов** — аспирант; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра информационно-измерительной техники; E-mail: Neruman@nextmail.ru
- Владимир Петрович Токарев** — канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра информационно-измерительной техники; E-mail: Usatu@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-измерительной техники

Поступила в редакцию
27.10.16 г.

Ссылка для цитирования: Кудашов Д. Д., Токарев В. П. Быстродействующая противопомпажная система газотурбинного двигателя // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 578—581.

FAST-ACTING ANTI-SURGE SYSTEM OF GAS TURBINE ENGINE**D. D. Kudashov, V. P. Tokarev**

Ufa State Aviation Technical University, 450008, Ufa, Russia
E-mail: Neruman@nextmail.ru

The factors affecting the occurrence of unstable modes of operation of a gas turbine engine (GTE) associated with the rate of change of the flow surge are examined. The problem of surge diagnostic system performance is considered. Several options are proposed to improve the performance of systems, diagnosing the GTE surge. Modeling of anti-surge system operation is performed with the use of simulation of majoritarian diagnostics of pre-damping state and surge. Results of the simulation study demonstrate that the use of the first derivative of operating parameters reduces the time of diagnosis for 40-120 ms, depending on operation mode and is beneficial to the whole system performance.

Keywords: gas turbine engine, compressor stall, parameters measurement, diagnostic system, anti-surge system

Data on authors

- Dmitry D. Kudashov** — Post-Graduate Student; Ufa State Aviation Technical University, Department of Information-Measuring Equipment; E-mail: Neruman@nextmail.ru
- Vladimir P. Tokarev** — PhD, Associate Professor; Ufa State Aviation Technical University, Department of Information-Measuring Equipment; E-mail: Usatu@yandex.ru

For citation: Kudashov D. D., Tokarev V. P. Fast-acting anti-surge system of gas turbine engine. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 6. P. 578—581 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-578-581